

استرالیا؛ پایگاه راهبردی تامین جهانی گالیوم

استرالیا یکی از معدود کشورهایی در سطح جهان به شمار می آید که از ذخایر قابل توجه فلز گالیوم برخوردار است؛ فلزی که در صنایع الکترونیک، تولید لامپ‌های ال ای دی و نیمه‌ساناها به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. در راستای تنوع‌بخشی به منابع مواد معدنی حیاتی، شرکت «Alcoa» اخیراً اعلام کرد که توافق‌نامه‌ای مشترک با شرکت «JAGA» به منظور بررسی امکان فراوری گالیوم در یکی از پالایشگاه‌های آلومینای خود واقع در غرب استرالیا امضا کرده است.

گفتنی است شرکت «JAGA» به واسطه همکاری میان شرکت «Sojitz» و سازمان تامین مواد معدنی و انرژی ژاپن (JOGMEC) راه‌اندازی شده که نمایانگر تلاش راهبردی ژاپن برای تامین مواد معدنی حیاتی داخلی در صنایع دفاعی و حوزه فناوری است.

فلز گالیوم و ارزش رویه‌رشد آن

فلز گالیوم که محصول جانبی فراوری بوکسیت محسوب می‌شود، اگرچه شاید در رسانه‌ها چندان بر روی پوشش اخبار آن مانور داده نمی‌شود اما واقعیت این است که در پشت پرده، این فلز جایگاهی کلیدی در تولید برخی از پیشرفته‌ترین سیستم‌ها و ابزارهای فناوریانه در جهان دارد. از گالیوم به‌طور گسترده در تولید سخت‌افزار هوش مصنوعی، نیمه‌ساناها و سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود. همانند بسیاری از فلزات و عناصر نادر خاکی، چین حدود ۸۰ درصد از عرضه جهانی فلز گالیوم را در اختیار دارد و اخیراً دولت این کشور محدودیت‌هایی بر صادرات این عنصر حیاتی اعمال کرده است. در این میان، کشورهایی مانند استرالیا، ژاپن و ایالات متحده آمریکا فلز گالیوم را عنصری مهم برای حفظ امنیت ملی و جایگاه خود در حوزه فناوری قلمداد کرده و این عنصر را در فهرست مواد اولیه حیاتی خود قرار داده‌اند.

نکته قابل توجه در خصوص گالیوم اینکه در حال حاضر از این فلز به عنوان یکی از عناصر کلیدی در حوزه هوش مصنوعی استفاده می‌شود. با توجه به رشد بی‌سابقه تقاضا برای سخت‌افزارهای تخصصی محاسباتی در حوزه هوش مصنوعی، ترکیبات گالیوم به ویژه نیترید گالیوم (GaN) به دلیل عملکرد عالی آن نسبت به نیمه‌ساناهای مبتنی بر سیلیسیم، نقش غیر قابل جایگزینی در فناوری‌های پیشرفته پیدا کرده است. بر همین اساس و در صورت موفقیت پروژه شرکت «Alcoa»، استرالیا می‌تواند به یکی از بزرگ‌ترین منابع تامین گالیوم در جهان تبدیل شود که این امر موقعیت ژئوپلیتیکی و اقتصادی این کشور را به‌طور قابل توجهی تقویت خواهد کرد. هرچند تاثیر مالی کوتاه‌مدت این پروژه بر درآمد‌های شرکت «Alcoa» قابل توجه نخواهد بود اما اقدام حرکتی جسورانه برای ایجاد یک پایگاه راهبردی در بلندمدت برای کاهش وابستگی کشورهای غربی به چین در زمینه تامین گالیوم محسوب می‌شود. طبق آخرین برآوردهای صورت گرفته، تولید گالیوم در پروژه شرکت «Alcoa» از سال ۲۰۲۶ آغاز خواهد شد.

شرکت «Critical Metals Corp» به گالیوم پرعیار دست یافت

پس از انتشار خبر همکاری شرکت «Alcoa» با شرکت «JAGA» در زمینه تولید گالیوم، شرکت «Critical Metals Corp» اعلام کرد که نتایج نمونه‌برداری‌های اخیر پروژه «Tanbreez» این شرکت در جنوب گرینلند نشان می‌دهد در پروژه نامبرده ذخایر قابل توجهی از گالیوم پرعیار وجود دارد. گزارش شرکت «Critical Metals Corp» که اخیراً مدتی آن منتشر شده، اهمیت راهبردی این پروژه را به‌ویژه در شرایط افزایش تنش‌های جهانی در زنجیره تامین برجسته‌تر کرده است. در بنیانه مطبوعاتی شرکت نامبرده اعلام شده است که در آخرین حفاری انجام شده به‌روش حفاری الماسی، عیار اکسید گالیوم در پروژه مذکور را در بازه ۱۴۰ تا ۱۶۰ قسمت در میلیون برآورده شده که به‌طور قابل توجهی بالاتر از میانگین عیار اعلام شده در سایر ذخایر این فلز راهبردی در نقاط مختلف جهان است.

تونی سیسج، مدیرعامل و مدیر اجرایی شرکت «Critical Metals Corp» در این بیانیه تأکید کرد: توسعه منابع داخلی گالیوم به دلیل ممنوعیت صادرات این فلز از سوی چین به آمریکا، امری ضروری و حیاتی است و دیگر نمی‌توان به‌تأمین آن از منابع خارجی به‌ویژه چین اکتفا کرد. با اینکه پتانسیل گالیوم در حوزه انرژی پاک غیر قابل انکار است اما فرایند استخراج این فلز به‌سادگی سایر مواد معدنی حیاتی نیست. در واقع، گالیوم به‌صورت مستقیم استخراج نمی‌شود بلکه تولید آن از طریق فراوری بوکسیت آلومینیوم و فلز روی انجام می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد از بیش از ۱۷ هزار تن گالیوم موجود در سنگ معدن بوکسیت، تنها حدود چهار هزار و ۵۰۰ تن آن به بازار عرضه می‌شود و مابقی به‌فرایند فراوری بوکسیت با باطله گل قرمز از بین می‌رود. این موضوع باعث شده است حجم عرضه گالیوم با حجم تقاضای آن در تعادل نباشد. علاوه بر این، تولید گالیوم به‌شرایط قیمت سایر فلزات در بازار جهانی وابسته است که همین عامل آسیب‌پذیری زنجیره تامین را افزایش می‌دهد. بر همین اساس کشورهای مانند آمریکا و هند با ریسک‌هایی ناشی از وابستگی بیش از حد به واردات گالیوم و سایر مواد اولیه حیاتی از چین مواجه هستند؛ اگرچه آمارهای دقیقی از میزان صادرات گالیوم چین منتشر نشده است اما داده‌های منتشر شده توسط سازمان تامین مواد معدنی و انرژی ژاپن نشان می‌دهد که این کشور یکی از واردکنندگان اصلی گالیوم از چین است. در همین راستا و در سال ۲۰۲۱، از ۱۶۷ تن گالیوم مصرفی در ژاپن، حدود ۹۷ تن آن از طریق واردات تامین شده و به‌گفته شماری از کارشناسان، حدود ۶۰ درصد این واردات از چین صورت گرفته است. با این حال، واردات گالیوم ژاپن از چین طی سال‌های اخیر به دلیل محدودیت‌های صادراتی پکن کاهش یافته است.

در مجموع استرالیا با اقداماتی حساب شده در جهت توسعه منابع داخلی گالیوم، در حال شکل دهی به نقشی محوری خود در زنجیره تامین جهانی این فلز حیاتی بوده که پیش از این تحت سلطه چین بوده است. این حرکت نه تنها فرصت‌های اقتصادی جدیدی برای کشور فراهم می‌آورد بلکه به‌عنوان راهبرد مهمی برای کاهش وابستگی کشورهای غربی به منابع محدود و پرریسکی مانند مواد معدنی حیاتی شناخته می‌شود. با توجه به افزایش حجم استفاده از هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین که به گالیوم وابسته هستند، می‌توان انتظار داشت نقش این فلز در اقتصاد جهانی و امنیت ملی کشورهای روزبه‌روز مهم‌تر شود و سرمایه‌گذاری‌هایی که امروز در این راستا انجام می‌شود، زمینه‌ساز موفقیت در ایجاد زنجیره تامین صنعت مواد معدنی حیاتی در آینده به‌ویژه در کشورهای غربی خواهد بود.

حرکت صنعت معدن به سمت عملیات کم‌کربن، به‌طور فزاینده‌ای شیوه طراحی و بهره‌برداری از معادن را متحول کرده است. امروزه برقی‌سازی دیگر صرفاً جایگزینی ناوگان دیزلی با تجهیزات برقی تلقی نمی‌شود، بلکه به بازنگری اساسی در نحوه تولید، توزیع و مدیریت انرژی در کل زنجیره استخراج و فراوری معدن تبدیل شده است. شرکت GlobalData، مالک نشریه Mining Technology، در گزارشی برقی‌سازی را «راهکار بلندمدت» صنعت معدن برای کربن‌زدایی معرفی کرده است؛ هرچند تأکید می‌کند که توسعه گسترده آن همچنان با محدودیت‌هایی مانند ظرفیت شبکه برق، نیاز به زیرساخت‌های شارژ و سرمایه‌گذاری‌های سنگین مواجه است.

اگر برقی‌سازی فراتر از جایگزینی تدریجی تجهیزات باشد، شرکت‌های معدنی باید در برنامه‌ریزی معدن، زیرساخت انرژی و سیستم‌های تولید چه تغییری ایجاد کنند؟

برقی‌سازی نباید صرفاً به‌عنوان جایگزینی ناوگان ماشین‌آلات در نظر گرفته شود؛ بلکه در اصل به معنای بازطراحی کامل سامانه معدن و فراوری است. زمانی که انرژی به یکی از مؤلفه‌های اصلی طراحی معدن تبدیل شود، برنامه‌ریزی استخراج، طراحی کارخانه و حتی فلسفه بهره‌برداری نیز تغییر می‌کند.

در یک معدن کاملاً برقی، زیرساخت انرژی به ستون فقرات معدن تبدیل می‌شود، نه صرفاً یک خدمت پشتیبان. در پروژه‌های جدید، این فرصت وجود دارد که سامانه برق، تجهیزات الکتریکی و اتوماسیون همزمان با طراحی معدن توسعه یابند تا از همان ابتدا میان ظرفیت انرژی، طراحی کارخانه و برنامه تولید هماهنگی ایجاد شود.

در معادن فعال، شرایط متفاوت است؛ زیرا باید با تجهیزات موجود، محدودیت‌های شبکه برق و الزامات عملیاتی کنار آمد. در چنین پروژه‌هایی، برقی‌سازی به‌صورت مرحله‌ای انجام می‌شود؛ از ارتقای زیرساخت برق گرفته تا اصلاح نحوه توزیع انرژی و استقرار تدریجی تجهیزات برقی بدون ایجاد اختلال در تولید. در هر دو حالت، اصل اساسی یکسان است: برقی‌سازی باید یک تحول سیستمی باشد، نه مجموعه‌ای از پروژه‌های پراکنده برای تعویض تجهیزات. البته اجرای مرحله‌ای این فرآیند می‌تواند ریسک کاهش بهره‌وری را کاهش دهد، اما هرچه هماهنگی میان انرژی، اتوماسیون و برنامه‌ریزی تولید بیشتر باشد، ارزش افزوده بیشتری ایجاد خواهد شد.

مدل ABB چگونه توزیع برق، اتوماسیون و بهینه‌سازی دیجیتال را در عمل با یکدیگر هماهنگ می‌کند؟

بیورن یونسون، در پروژه Thacker Pass این هماهنگی از طریق زیرساخت یکپارچه کنترل و مدیریت انرژی انجام می‌شود. سامانه مدیریت انرژی ABB به‌صورت پیوسته میزان برق دریافتی از شبکه، تولید داخلی، مصرف کارخانه و جریان انرژی را پایش می‌کند و امکان متعادل‌سازی لحظه‌ای مصرف و تولید برق را فراهم می‌سازد. سامانه کنترل فرآیند کارخانه نیز به‌صورت همزمان با سامانه مدیریت انرژی فعالیت می‌کند و از طریق لایه‌های مشخص ارتباطی با آن در تعامل است؛ به‌گونه‌ای که نیازهای تولید، الزامات ایمنی و میزان انرژی در دسترس همواره با یکدیگر هماهنگ باقی می‌مانند. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این سامانه، مدیریت هوشمند بار مصرفی است؛ به‌طوری‌که در صورت کاهش توان شبکه، اولویت مصرف انرژی میان بخش‌های مختلف معدن تنظیم شده و از بروز اختلال در عملیات جلوگیری می‌شود. به این ترتیب، انرژی از یک ورودی ثابت به منبعی پویا و قابل مدیریت تبدیل می‌شود. در سطح بالاتر نیز سامانه‌های تحلیل داده و بهینه‌سازی دیجیتال، عملکرد انرژی و تولید را به‌صورت مستمر پایش کرده و زمینه افزایش بهره‌وری و پایداری عملیات را فراهم می‌کنند.

برقی‌سازی در فرآیندهای انرژی بر تولید لیتیوم مانند لیچینگ، خالص‌سازی و پالایش چه نقشی دارد؟

برقی‌سازی تنها به ماشین‌آلات استخراج محدود نیست، بلکه کل کارخانه فراوری را نیز دربر می‌گیرد. این مجموعه علاوه بر استخراج سنگ معدن، یک فرآیند شیمیایی پیوسته برای تولید کربنات لیتیوم با درجه باتری را اجرا می‌کند که شامل خردایش، لیچینگ با اسید سولفوریک و مراحل خالص‌سازی است. این فرایندها مصرف انرژی بسیار بالایی دارند و به مدیریت دقیق برق و حرارت وابسته هستند.

یکی از ویژگی‌های مهم این پروژه، بازیافت حرارت حاصل از تولید اسید سولفوریک است. این حرارت برای تولید بخار استفاده می‌شود و بخار نیز توربین‌های تولید برق را به حرکت درمی‌آورد؛ در نتیجه بخشی از انرژی مورد نیاز سایت در داخل مجموعه تامین شده و

در ترجمه اختصاصی بررسی می‌کند:

برقی‌سازی؛ انقلاب بعدی در صنعت معدن



تولید خودروهای برقی، به‌عنوان الگویی برای به‌کارگیری همزمان فناوری‌های نوین انرژی و بهره‌برداری در معادن بزرگ جهان نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در همین راستا، صمت در ترجمه اختصاصی گفت‌وگوی Mining Technology با «بیورن یونسون»، مدیر جهانی بخش معدن و مواد ABB، الزامات برقی‌سازی معادن، نقش سامانه‌های هوشمند انرژی و چشم‌انداز معادن آینده را بررسی کرده است.

تازه‌ترین چارچوب کربن‌زدایی شرکت ABB، معدن تمام‌برقی را به‌عنوان یک سامانه یکپارچه متشکل از برقی‌سازی، اتوماسیون و مدیریت دیجیتال انرژی تعریف می‌کند. این رویکرد اکنون در پروژه لیتیوم Thacker Pass متعلق به شرکت تولید، توزیع و فرآوری معدن تبدیل شده است. شرکت اجرا در آمده است؛ جایی که ABB مسئول تأمین سامانه‌های توزیع برق، ایستگاه‌های برق پیش‌ساخته (E-House) و پلتفرم مدیریت انرژی کل سایت است. پروژه Thacker Pass که هم‌اکنون در حال ساخت است و نخستین تولید آن برای سال ۲۰۲۸ برنامه‌ریزی شده، بزرگ‌ترین ذخیره اثبات‌شده لیتیوم آمریکای شمالی را در اختیار دارد. این پروژه علاوه بر تأمین کربنات لیتیوم مورد نیاز زنجیره

وابستگی به شبکه برق کاهش می‌یابد. در کنار این موضوع، برق شبکه و تولید داخلی نیز از طریق سامانه مدیریت انرژی ABB به‌صورت لحظه‌ای مدیریت می‌شود تا تعادل میان تولید، مصرف و منابع مختلف انرژی حفظ شود. به بیان دیگر، برقی‌سازی تنها جایگزینی تجهیزات دیزلی نیست، بلکه کل زنجیره فراوری را به یک سامانه یکپارچه انرژی تبدیل می‌کند؛ موضوعی که اهمیت یکپارچه‌سازی تولید، بازیافت انرژی و مدیریت برق را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

از ننگ‌ها، معدن تمام‌برقی طی پنج تا ده سال آینده چه ویژگی‌هایی خواهد داشت؟

معدن تمام‌برقی آینده، معدنی است که استخراج، فراوری و سامانه انرژی آن به‌عنوان یک مجموعه واحد طراحی و مدیریت می‌شود. در چنین معدنی، تجهیزات استخراج و کارخانه همگی برقی خواهند بود، انرژی از منابع مختلف شامل شبکه، تولید داخلی و در صورت امکان انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌شود و سامانه‌های کنترل نیز به‌صورت لحظه‌ای میان تقاضای تولید و انرژی موجود تعادل برقرار می‌کنند.

پروژه Thacker Pass هم‌اکنون نمونه‌ای اولیه از این الگو را ارائه می‌دهد. این پروژه از برق شبکه، انرژی حاصل از بازیافت حرارت و سامانه مدیریت انرژی ABB به‌صورت همزمان استفاده می‌کند تا حتی در شرایط ضعف شبکه نیز پایداری عملیات حفظ شود. در سال‌های آینده، انتظار می‌رود برقی‌سازی بیش از گذشته با اتوماسیون تلفیق شود و تصمیمات مربوط به تولید و مدیریت انرژی به‌صورت کاملاً هماهنگ اتخاذ شوند. همچنین معادن به سمت استفاده همزمان از چندین منبع انرژی حرکت خواهند کرد و زیرساخت‌های برق نیز به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که توسعه ظرفیت تولید بدون بازطراحی کامل سامانه امکان‌پذیر باشد.

البته سرعت این تحول همچنان به محدودیت‌های عملی وابسته است. در بسیاری از مناطق، ظرفیت و پایداری شبکه برق هنوز پاسخگوی نیاز معادن برقی نیست. علاوه بر آن، یکپارچه‌سازی سامانه‌های برق، اتوماسیون و تجهیزات مختلف به معمولاً توسط شرکت‌های گوناگون تأمین می‌شوند، به سرمایه‌گذاری و مهندسی پیچیده‌تری نیاز دارد.

در مجموع، مسیر آینده صنعت معدن به‌روشنی به سمت معادن کاملاً برقی و هوشمند حرکت می‌کند؛ اما این گذار تدریجی خواهد بود. پروژه‌هایی مانند Thacker Pass نشان می‌دهند که تحقق این هدف در معادن جدید امکان‌پذیر است، هرچند گسترش آن در سراسر صنعت زمان‌بر خواهد بود و همه پروژه‌ها مسیر یکسانی را طی نخواهند کرد.

هوش مصنوعی چه نقشی در مدیریت معادن تمام‌برقی آینده خواهد داشت؟

هوش مصنوعی در سال‌های آینده به یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر معادن تمام‌برقی تبدیل خواهد شد. هرچه سطح برقی‌سازی، اتوماسیون و دیجیتال‌سازی در معادن افزایش یابد، حجم داده‌های تولیدشده نیز به‌طور چشمگیری بیشتر می‌شود. بدون استفاده از سامانه‌های هوشمند، مدیریت این حجم از اطلاعات و تبدیل آن به تصمیمات عملیاتی، عملاً امکان‌پذیر نخواهد بود.

هوش مصنوعی این قابلیت را دارد که به‌صورت لحظه‌ای اطلاعات مربوط به مصرف انرژی، عملکرد تجهیزات، وضعیت شبکه برق، فرآیندهای کارخانه و شرایط عملیاتی معدن را تحلیل کند و بهترین تصمیم را برای حفظ پایداری تولید اتخاذ کند. این فناوری همچنین در حوزه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه نقش بسیار مهمی خواهد داشت؛ به این معنا که پیش از وقوع خرابی، زمان مناسب تعمیر یا تعویض تجهیزات را پیش‌بینی می‌کند و از توقف‌های ناخواسته تولید جلوگیری می‌شود.

از سوی دیگر، هوش مصنوعی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف

انرژی نیز کمک کند. در معادن آینده که از منابع مختلف انرژی مانند شبکه برق، نیروگاه‌های داخلی و انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده خواهند کرد، مدیریت همزمان این منابع بدون بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند بسیار دشوار است. بنابراین، هوش مصنوعی نه‌تنها بهره‌وری را افزایش می‌دهد، بلکه نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و دستیابی به اهداف کربن‌زدایی ایفا خواهد کرد.

آیا برقی‌سازی می‌تواند علاوه بر کاهش انتشار کربن، هزینه‌های عملیاتی معادن را نیز کاهش دهد؟

بدون تردید، برقی‌سازی تنها یک اقدام زیست‌محیطی نیست و در بلندمدت می‌تواند مزایای اقتصادی قابل توجهی نیز به همراه داشته باشد. البته باید پذیرفت که اجرای پروژه‌های برقی‌سازی، به‌ویژه در معادن بزرگ، مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجه برای توسعه زیرساخت‌های برق، اتوماسیون و سامانه‌های کنترل است. اما اگر چرخه عمر یک معدن را در نظر بگیریم، این سرمایه‌گذاری در بسیاری از موارد با کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران خواهد شد.

تجهیزات برقی در مقایسه با ماشین‌آلات دیزلی، قطعات متحرک کمتری دارند و به همین دلیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها پایین‌تر است. همچنین حذف مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش هزینه حمل سوخت به معادن دورافتاده و افزایش بازده انرژی، صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد می‌کند. در کنار این موارد، سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی می‌توانند مصرف برق را بهینه کرده و از اتلاف انرژی جلوگیری کنند؛ موضوعی که به‌ویژه در کارخانه‌های فراوری با مصرف انرژی بالا اهمیت زیادی دارد. از سوی دیگر، بسیاری از شرکت‌های معدنی امروز علاوه بر هزینه‌های عملیاتی، با فشارهای ناشی از مقررات زیست‌محیطی، مالیات کربن و الزامات سرمایه‌گذاران در حوزه ESG نیز مواجه هستند. بنابراین برقی‌سازی علاوه بر کاهش هزینه‌های مستقیم، می‌تواند ریسک‌های مالی و زیست‌محیطی شرکت‌ها را نیز کاهش دهد و مزیت رقابتی آن‌ها را در بازارهای جهانی افزایش دهد.

بزرگ‌ترین مانع تحقق معادن تمام‌برقی در جهان چیست؟

مهم‌ترین چالش، زیرساخت انرژی است. بسیاری از معادن جهان در مناطق دورافتاده فعالیت می‌کنند؛ مناطقی که یا به شبکه برق دسترسی ندارند یا شبکه موجود از ظرفیت و پایداری لازم برای پشتیبانی از یک معدن تمام‌برقی برخوردار نیست. در چنین شرایطی، توسعه زیرساخت‌های انتقال برق یا احداث نیروگاه‌های محلی، خود به سرمایه‌گذاری و زمان قابل توجهی نیاز دارد.

چالش دیگر، یکپارچه‌سازی فناوری‌های مختلف است. برقی‌سازی تنها به نصب تجهیزات الکتریکی محدود نمی‌شود؛ بلکه باید سامانه‌های توزیع برق، اتوماسیون، نرم‌افزارهای مدیریت انرژی، تجهیزات فراوری و ماشین‌آلات معدنی به‌صورت هماهنگ با یکدیگر کار کنند. هرچه تعداد تأمین‌کنندگان فناوری بیشتر باشد، پیچیدگی طراحی، مهندسی و راه‌اندازی پروژه نیز افزایش خواهد یافت.

در کنار این مسائل، تأمین سرمایه همچنان یکی از موانع مهم توسعه این فناوری است. اگرچه مزایای اقتصادی برقی‌سازی در بلندمدت قابل توجه است، اما بسیاری از پروژه‌ها برای تأمین سرمایه اولیه با دشواری مواجه هستند. به همین دلیل، همکاری نزدیک میان شرکت‌های معدنی، تأمین‌کنندگان فناوری، دولت‌ها و سرمایه‌گذاران برای تسریع این روند ضروری است.

با وجود همه این چالش‌ها، روند جهانی کاملاً روشن است. فشار برای کاهش انتشار کربن، توسعه فناوری‌های جدید و افزایش تقاضا برای مواد معدنی موردنیاز اقتصاد سبز، موجب خواهد شد که معادن به‌تدریج به سمت برقی‌سازی، اتوماسیون و مدیریت هوشمند انرژی حرکت کنند و این تحول طی دهه آینده با سرعت بیشتری ادامه یابد.